

# СЕМЕЙСТВО ЭКО-АКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ЕСО4 КОМПАНИИ BOMBARDIER: дизельный агрегат C.L.E.A.N.



**В 2008 г. на выставке InnoTrans в Берлине компания Bombardier впервые предложила операторам железнодорожного рынка свой уникальный портфель инновационных решений и продуктов под названием ЕСО4, олицетворяющий собой баланс четырех основополагающих «Э» (энергии, эффективности, экономичности и экологии). Внедрение технологий ЕСО4, которые могут быть приспособлены для любого парка средств рельсового транспорта, может обеспечить совокупное снижение энергопотребления вплоть до 50%, а также сократить затраты и выбросы парниковых газов в атмосферу.**

Программа ЕСО4 является ответом компании Bombardier на высокие требования железнодорожных операторов. Комплекс ее технических решений касается снижения веса конструкций, уменьшения объема необходимого технического обслуживания и ремонта тележек, износа колес и рельсов, усовершенствования системы кондиционирования воздуха и оптимизации аэродинамических качеств высокоскоростных поездов, а также перехода к тяговому электроснабжению рельсового транспорта без использования воздушной контактной сети.

На данный момент портфель ЕСО4 включает в общей сложности пятнадцать продуктов, которые задают новые стандарты отрасли относительно снижения затрат на энергоносители и выбросов в окружающую среду, а также повышения экологичности. Со времени официального открытия программы отмечено более ста двадцати примеров успешного применения технологий ЕСО4 заказчиками по всему миру.

## Дизельный силовой агрегат C.L.E.A.N.

В условиях ограниченных финансовых возможностей особое значение приобретают эффективные технические решения в области тягового привода для автономного подвижного состава, соответствующего строгим требованиям к норме содержания вредных веществ в выхлопных газах. Созданный в рамках программы ЕСО4 силовой агрегат C.L.E.A.N. является примером разработок такого рода.

Экономическая эффективность возможна лишь при сочетании высокой эксплуатационной готовности подвижного состава и, по мере возможности, невысокой цены. Заказчики все чаще обращают внимание на расходы по эксплуатации и техническому обслуживанию. В то же время ужесточаются требования законодательных актов и других регламентирующих документов к защите окружающей среды и безопасности. С изменением стандартов, устанавливающих допустимые нормы вредных выбросов для дизель-поездов, повышением тре-

бований к их прочности, безопасности при столкновениях, а также к уровню излучаемого шума разработчикам приходится решать разноплановые задачи. На первый взгляд может показаться, что некоторые из новых требований противоречат друг другу. Так, для контроля содержания вредных веществ в выхлопных газах необходимо оснащение дизелей системами очистки, что предполагает использование дополнительного оборудования. При этом все более сложными становятся системы впрыска топлива. Для предотвращения увеличения массы дизелей при одновременном снижении расхода топлива необходимы комплексные решения, относящиеся ко всей системе тягового привода.

Компанией Bombardier в рамках осуществления программы ЕСО4 был разработан высокоэффективный тяговый привод для дизельного пассажирского подвижного состава на базе силового агрегата, получившего название C.L.E.A.N. (Catalyst based Low Emission ApplicatioN), с низким уровнем вредных

выбросов, достигнутым благодаря использованию каталитического нейтрализатора.

### Требования к составу выхлопных газов

С принятием в Европе директивы 2004/26/ЕС, регламентирующей вредные выбросы в атмосферу транспортными средствами, не предназначенными для движения по автомобильным дорогам (Directive on Emission from Nonroad Mobile Machinery), в ЕС впервые была создана правовая основа для требований к уровню вредных выбросов дизелей, установленных на автономном рельсовом подвижном составе. Ранее такие требования определялись документами МСЖД или контрактами, заключавшимися между поставщиками и заказчиками подвижного состава. Для дизель-поездов применялись главным образом нормы Euro II и Euro III, устанавливающие предельное содержание вредных веществ в выхлопных газах и регламентирующие испытания дизелей большегрузных автомобилей. Согласно Директиве 2004/26/ЕС, уровень содержания окислов азота и частиц сажи должен быть существенно снижен при одновременном изменении циклов испытаний для новых двигателей дизель-поездов и тепловозов. Дизели для пассажирского моторвагонного подвижного состава, принятые в эксплуатацию после 1 января 2006 г., должны удовлетворять требованиям уровня IIIA, а 1 января 2012 г. вводятся требования уровня IIIB (табл. 1). Большинство производителей дизелей в состоянии обеспечить соблюдение требований уровня IIIA, однако это вызовет увеличение расхода топлива и существенный рост мощности тепловых потерь, требующих отвода. Это влечет за собой дополнительное увеличение потребления топлива и, соответственно, эксплуатационных затрат. Для выполнения требований уровня IIIB станет обязательным оснащение дизелей системами нейтрализации выхлопных газов в целях выполнения еще более жестких ограничений содержания окис-

лов азота и частиц сажи. В этом случае возможны два решения:

- обеспечение процесса сгорания топлива с пониженным содержанием окислов азота приведет к увеличению содержания в выхлопных газах частиц сажи и необходимости их эффективного улавливания с помощью соответствующих фильтров. Другими побочными эффектами такого решения станут дополнительная потребность в отводе тепла и увеличение расхода топлива. Следует также учитывать расходы на постоянно требующуюся при этом регенерацию и периодическую очистку фильтров, особенно в условиях железнодорожной эксплуатации, характеризующейся значительной продолжительностью работы тяговых установок в режиме холостого хода;
- обеспечение процесса сгорания топлива с интенсивным сжиганием частиц сажи вызовет рост содержания в неочищенных выхлопных газах окислов азота и потребует их удаления с помощью каталитического процесса. При этом потребность в охлаждении, особенно сжатого воздуха системы турбонаддува, будет значительно ниже по сравнению с первым вариантом, к тому же станет возможной реализация оптимального процесса сгорания топлива. В то же время возникнет необходимость использования дополнительного реагента AdBlue (раствор технически чистой мочевины в деминерализованной воде) для уменьшения содержания вредных веществ в выхлопных газах. Вследствие сокращения расхода топлива снизятся также выбросы CO<sub>2</sub>. Комплексный анализ преимуществ и недостатков рассмотренных методов, а также эффективности их использования на железнодорожном подвижном составе послужил основой для разработки агрегата, включающего в себя дизель, передачу и систему очистки выхлопных газов. В результате компанией Bombardier был создан силовой агрегат C.L.E.A.N. (рис. 1).



Рис. 1. Силовой агрегат C.L.E.A.N. с системой очистки выхлопных газов

### Проект C.L.E.A.N.

В августе 2006 г. на заводе в г. Хеннигсдорф (Германия) компания Bombardier приступила к разработке силового агрегата C.L.E.A.N. Основные цели были сформулированы следующим образом:

- создание дизеля, соответствующего требованиям к вредным выбросам уровня IIIB;
- применение эффективной тяговой передачи, обеспечивающей минимальные потери мощности и снижение расхода топлива;
- максимально возможное снижение общей массы системы тягового привода;
- возможность использования силового агрегата на уже существующем подвижном составе с имеющимися системами охлаждения и вспомогательным оборудованием без необходимости адаптации;
- сокращение затрат на техническое обслуживание. С целью снижения затрат на разработку были максимально использованы технические решения, ранее реализованные на двигателях грузовых автомобилей. Некоторое увеличение массы, обусловленное применением системы очистки выхлопных газов, следовало компенсировать за счет других эффективных технических решений. Проект финансировали министерство экономики федеральной земли Бранденбург (Германия) и ЕС.

### Модульный блок дизеля

Дизель устанавливается с помощью эластичных опор на цельносварной раме, которая, в свою очередь, крепится к продольному брусу моторного вагона через четыре вертикальных эластичных опоры, обеспечивающие уменьшение вибрации. Кожух тяговой передачи крепится болтами к кожуху маховика дизеля. Генератор, соединенный с дизелем эластичным торсионным валом, подве-

Таблица 1. Ограничения ЕС по вредным выбросам дизелей железнодорожного подвижного состава

| Нормы                 | Применимость для железнодорожного транспорта | Содержание вредных веществ, г/кВт·ч |      |     |              |
|-----------------------|--|-------------------------------------|------|-----|--------------|
|                       |  | NO <sub>x</sub>                     | HC   | CO  | Частицы сажи |
| Euro II               | Не применяется                               | 7,0                                 | 1,1  | 4,0 | 0,15         |
| Euro III              | Не применяется                               | 5,0                                 | 0,66 | 2,1 | 0,1          |
| Уровень III A 2004/26 | Применяется с 2006 г.                        | 4,0                                 |      | 3,5 | 0,2          |
| Уровень III B 2004/26 | Применяется с 2012 г.                        | 2,0                                 | 0,19 | 3,5 | 0,025        |

шен к несущей раме. Такая компоновка позволила сократить количество узлов и обеспечить их быструю замену без демонтажа всего модульного блока. Для эффективного смешивания потока выхлопных газов с реагентом и ламинарного прохождения смеси через систему каталитической очистки выхлопных газов последняя расположена в носовой части поезда. Резервуар для реагента AdBlue размещен под силовым агрегатом и имеет достаточно большую емкость (150 л), что позволяет эксплуатировать систему без дозаправки в течение нескольких суток и за счет этого существенно сократить расходы. Принятая конструкция узлов силового агрегата и их компоновка позволили снизить его удельную массу до 7,9 кг/кВт, что примерно на 20% меньше по сравнению с предыдущими разработками, несмотря на наличие системы очистки выхлопных газов.

### Конструкция дизеля и системы очистки выхлопных газов

Применение системы очистки выхлопных газов на основе селективного каталитического восстановления (технологии SCR) обеспечивает эффективное удаление частиц сажи при весьма малом расходе топлива. В качестве основы силового агрегата выбран 8-цилиндровый V-образный дизель модели FVQE2883z\*c200 компании Fiat Powertrain, который развивает мощность 570 кВт при частоте вращения коленчатого вала 1750 об/мин. Дизель оснащен системой впрыска топлива Common rail, обеспечивающей оптимизацию по времени многоступенчатого впрыска при постоянном высоком давлении топлива, поступающего из магистрали, в которой это давление создается специальным насосом. Теплообменник надувочного воздуха рассеивает возникающее избыточное тепло при помощи низкотемпературного контура. Вследствие высокой температуры сгорания топлива в выхлопных газах образуется лишь незначительное количество частиц сажи. Их содержание практически соответствует действующим нормам даже без дополнительной очистки. С помощью процесса SCR снижается содержание окислов азота в выхлопных газах. Помимо этого, в системе использована разработанная компанией ComAp (Чехия) противодетонационная система DENOX2, которая функционирует без использования сжатого воздуха. Применяемый в технологии SCR реагент AdBlue (или AUS32) представляет собой водный раствор мочевины с концентрацией 32,5%, который впрыскивается в выхлопной коллектор. Мочевина ((NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CO) широко использу-

ется в сельском хозяйстве в качестве компонента различных удобрений. Поскольку реагент AdBlue замерзает при температуре ниже -11 °С, предназначенный для него резервуар снабжен подогревателем. В зависимости от диапазона температур, в котором эксплуатируется подвижной состав, трубопроводы реагента также могут быть снабжены подогревателями. Реагент AdBlue впрыскивается в соответствии с режимом работы дизеля, задаваемым блоком управления. Соответствующая информация передается с регулятора дизеля на устройства управления процессом SCR на основе характеристик дизеля. Под действием высокой температуры выхлопных газов после впрыска реагент разлагается на двуокись углерода и аммиак. Аммиак вступает в химическую реакцию с окисью и двуокисью азота, в результате чего образуются азот и вода. Использование такой технологии позволяет преобразовать примерно 85% объема окислов азота и обеспечить их содержание в выхлопных газах, соответствующее требованиям уровня IIIB.

### Силовая передача

На дизель-поездах с мощностью тягового агрегата более 400 кВт, как правило, применяются гидродинамическая и электрическая передача мощности. И та, и другая имеют значительно меньший КПД по сравнению с механической передачей. В то же время высокая эффективность передачи мощности является важнейшим условием снижения потребления топлива. Гидродинамическая передача вследствие специфиче-

ских особенностей конструкции в этом отношении достигла предела своих возможностей. Для рассматриваемого силового агрегата было решено применить интеллектуальную 6-ступенчатую гидромеханическую передачу ECOLIFE Rail (рис. 2), созданную компанией ZF Friedrichshafen (Германия) на базе усовершенствованной передачи ECOMAT, которая широко используется в межрегиональных дизель-поездах. Ее гидродинамический преобразователь крутящего момента используется с минимальными гидравлическими потерями при трогании с места и дальнейшем ступенчатом изменении величины крутящего момента по мере разгона примерно до скорости 20 км/ч. Благодаря этому даже на малой скорости движения может быть достигнут КПД, превышающий 95%. Узел гидромеханической передачи присоединяется непосредственно к дизелю и может быть заменен без демонтажа всего силового агрегата. В конструкцию также интегрирован гидродинамический тормоз, выполняющий роль дополнительного.

### Система охлаждения

В пассажирских поездах с пониженным уровнем пола пространство для размещения подвагонного оборудования ограничено. Высокая температура наружного воздуха и наличие грязи и пыли в подвагонном пространстве создают определенные трудности при расположении там системы охлаждения. Приемлемой альтернативой может стать установка оборудования на крыше, несмотря на увеличение



Рис. 2. Новая 6-ступенчатая гидромеханическая передача ECOLIFE Rail

затрат из-за необходимости в дополнительных трубопроводах. Избыточное тепло, выделяемое дизелем, рассеивается в двух независимых контурах — высоко- и низкотемпературном. Путем оптимального подбора мощности и частоты вращения вентиляторов удалось существенно сократить потребление энергии системой охлаждения. Благодаря изменению тепловых потоков нового дизеля стало возможным использование изготовленной компанией Behr Industrietechnik (Германия) системы охлаждения после незначительной доработки без изменения внешних присоединений. Даже при максимальной потребности в охлаждении необходимая для рассеивания тепла мощность составляет лишь около 2,6% мощности дизеля, что существенно ниже в сравнении с другими известными системами охлаждения, потребляемая мощность которых достигает 9% мощности дизеля. Регулирование работы вентиляторов осуществляется при помощи системы управления в соответствии с фактической потребностью в рассеивании тепла.

#### **Электроснабжение вспомогательного оборудования**

Питание вспомогательного оборудования осуществляется от бортовой сети напряжением 400 В, которое вырабатывается синхронным генератором с непосредственным приводом от дизеля и преобразуется в напряжение постоянного тока с помощью инвертора. Применение непосредственного привода с эластичной муфтой позволило сократить до минимума потери напряжения относительно использовавшихся ранее приводов с гидравлической муфтой. С помощью соответствующей подвески генератор интегрирован в единый силовой блок, что обеспечивает его быструю замену в случае необходимости. В последние годы был достигнут заметный прогресс в развитии электронных систем управления дизелем и передачей. В частности, на грузовых автомобилях для обмена информацией между компонентами привода нашли применение шины сети передачи данных CAN стандарта J1939. Для подключения новых компонентов привода к существующей системе управления было принято решение использовать программируемый логический контроллер в качестве стандартизированного интерфейса между тяговым приводом и ходовой частью. Данное устройство обеспечивает связь через шину CAN между различными узлами системы управления и отображение работы силового агрегата. Сигналы, относящиеся к обеспечению безопасности движения, дискретно

передаются на соответствующие компоненты оборудования. Контроллер силового агрегата одновременно управляет работой вентиляторов системы охлаждения в соответствии с фактической потребностью. Все входящие диагностические сигналы, поступающие от компонентов оборудования, передаются контроллером силового агрегата на контроллер управления дизель-поездом через многофункциональную поездную шину и при необходимости выводятся на дисплей.

#### **Испытания**

Интенсивные испытания силового агрегата C.L.E.A.N. проходили с 2007 г. на заводе компании Bombardier в Хеннигсдорфе. После приемки и регулировки устройств управления программа испытаний предусматривала измерение тепловых параметров, первичную оптимизацию программы переключения передач, а также контроль потребления топлива и реагента AdBlue. С помощью нагрузочного генератора были проведены статические и динамические стендовые испытания агрегата. На стенде можно было выполнить моделирование движения поезда, задавая либо режимы тяги и торможения, либо параметры предварительно рассчитанных режимов. Компания Bombardier располагает программой, предусматривающей возможность выполнения расчетов в полном объеме. Данная программа использовалась для проведения сравнительных расчетов режимов работы дизель-поездов с прежней силовой установкой и с силовым агрегатом C.L.E.A.N. Помимо моделирования, были также проведены испытания в реальных эксплуатационных условиях. Расче-

ты показали, что использование силового агрегата C.L.E.A.N. позволяет достичь существенной экономии топлива по сравнению с прежней силовой установкой благодаря оптимизации режимов работы. Информация о расчетном прохождении маршрута передавалась в центр управления испытаниями и воспроизводилась там автоматически. Погрешность результатов расчетов составила в среднем 3%. Кроме того, определялся расход реагента AdBlue в условиях, близких к реальным. В зависимости от профиля участка и продолжительности работы дизеля в режиме холостого хода расход реагента составил примерно 3% расхода топлива. В марте 2008 г. была проведена процедура сертификации силовой установки C.L.E.A.N., после чего стало возможным ее использование на дизель-поездах.

#### **Дизель-поезда ITINO с новыми силовыми агрегатами**

С введением в действие Директивы 2004/26/ЕС для подвижного состава, выпущенного после 2006 г., дизели подлежат обязательной замене на другие, соответствующие уровню Euro II по нормам вредных выбросов. Переговоры подтвердили заинтересованность заказчиков в принятии экологических решений, обеспечивающих соответствие силовых установок требованиям уровня IIIA. Первыми образцами подвижного состава, оснащенного силовыми агрегатами C.L.E.A.N., стали поставленные ранее компанией Bombardier для Швеции и Германии дизель-поезда ITINO (рис. 3), имеющие конструкционную скорость 140 км/ч и предназначенные для местного сообщения с частыми остановками в регионе, расположенном



**Рис. 3. Дизель-поезд ITINO, оборудованный силовым агрегатом C.L.E.A.N.**

к югу от Франкфурта-на-Майне (Германия), а также для линий с меньшим числом остановок в Швеции. Основными условиями было соблюдение ограничений по массе и габаритам при размещении нового силового агрегата с дополнительным оборудованием, а именно с системой очистки выхлопных газов, а также сохранение используемой системы управления. При этом нужно было также сохранить систему охлаждения. Летом 2008 г. новыми силовыми агрегатами были оснащены четыре дизель-поезда ITINO, предназначенных для линии Odenwaldbahn (Германия), а затем 13 дизель-поездов для Швеции. После монтажа в Хеннигсдорфе были проведены испытания на заводских путях и приемка всех систем поезда. После этого была выполнена сертификация поездов для эксплуатации на сети железных дорог Германии (DB). На линиях с большим числом кривых и значительными уклонами, проходящих через федеральные земли Бранденбург и Саксония, были проведены испыта-

тельные поездки с максимальной допустимой скоростью. В октябре 2009 г. дизель-поезд, оборудованный силовым агрегатом C.L.E.A.N. был представлен на международной выставке Nordic Rail, где также были выполнены демонстрационные поездки. Затем последовали ходовые испытания на линиях железных дорог Швеции, а в конце 2009 г. обновленные дизель-поезда поступили в регулярную эксплуатацию в этой стране. Окончательная приемка в эксплуатацию переоснащенных дизель-поездов серии ITINO, предназначенных для линии Odenwaldbahn, прошла в марте 2010 г.

### **Эксплуатация в зимних условиях**

Несмотря на начало эксплуатации модернизированных дизель-поездов в Швеции, их ожидали серьезные испытания на подтверждение эксплуатационной готовности в сложных погодных условиях. В связи с этим на одном из дизель-поездов, предназначенных для Швеции, было установлено необхо-

димое измерительное оборудование. В январе 2010 г. поезд был подвергнут испытаниям на пересекающей Полярный круг линии Несше — Эстерсунд — Кируна, интенсивно эксплуатируемой в зимнее время. За 14 дней пробег дизель-поезда составил более 6000 км, при этом отказов силовой установки C.L.E.A.N. зафиксировано не было. Не наблюдалось также случаев замерзания реагента AdBlue в резервуаре даже при остановленном дизеле и без прогрева, поскольку остаточное тепло от силовой установки сохранялось в течение нескольких часов и благодаря этому температура реагента поддерживалась выше точки замерзания. Результаты зимних испытаний дали возможность разрешить эксплуатацию модернизированных дизель-поездов в погодных условиях Швеции без ограничений.

**Локомотив**

*Подготовила Е. Сидоренко  
по материалам журнала  
Railvolution № 1/2011  
и электронных СМИ*